

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Лебеда Олександра Анатолійовича “Нелінійні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному імпульсному полі лазера”, яка подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Актуальність обраної теми. Інтерес до квантової електродинаміки (КЕД) у полі плоскої електромагнітної хвилі (полі лазера) виник на початку 60-х років минулого століття, коли було створено джерело лазерного випромінювання. Крім того, було доведено, що розв’язок Д.М. Волкова для електрона в полі плоскої хвилі представляють з себе повний набір ортогональних нормованих функцій. Ця умова є суттєвою для побудови теорії збурень, у котрій в якості базових функцій використовуються нестационарні хвильові функції. КЕД процеси в полі лазерної хвилі можна поділити на дві групи. Одні з них йдуть тільки при присутності поля (процеси, індуковані полем лазера). До елементарних таких процесів належать випромінювання електрона та народження електрон-позитронної пари фотоном, а також крос-симетричні до них: перетворення фотона і електрона в електрон та анігіляція електрона і позитрона в один фотон. За відсутності поля ці процеси заборонені законом збереження енергії та імпульсу. Друга група КЕД процесів характеризується тим, що вони є автономними, іншими словами, мають місце і за відсутності поля лазера. Присутність поля надає таким процесам нові якості, вивченню і аналізу деяких з них саме і присвячена дисертаційна робота Лебеда О.А., котрий називає такі процеси лазер-модифікованими. Серед них розсіяння електрона в екранованому полі ядра, випромінювання електроном та народження електрон-позитронної пари фотоном в полі ядра і електрон-електронне розсіяння.

Найбільш цікавими в лазер-модифікованих процесах є нелінійні ефекти, зумовлені багаторазовою взаємодією заряджених частинок із полем лазерної хвилі. Відповідна лазерна хвиля має бути дуже інтенсивною, і збільшення її потужності значною мірою пов’язано зі скороченням тривалості лазерних імпульсів. Тобто така хвиля не є монохроматичною і її опис потребує введення обвідної функції, яка дозволяє врахувати імпульсний характер лазерного поля. Опис лазер-модифікованих процесів у таких полях, який виконано в дисертації Лебеда О.А., суттєво відрізняється від відповідного опису в полі монохроматичної лазерної хвилі.

Лазерні хвилі високої інтенсивності широко використовуються у різних галузях фізики. Я відзначу тільки можливість прискорення заряджених частинок в полі лазера та генерації, за рахунок зворотного комптонівського розсіяння, направлених пучків фотонів високої енергії, які можуть бути використані для пошуку сигналу фізики за межами Стандартної Моделі при взаємодії цих фотонів з пучками електронів або позитронів.

Європейський міжнародний проект фундаментальних досліджень з екстремально сильними електромагнітними полями ELI (Extrime Light Infrastructure) планує створення у Чехії надпотужного лазера з рекордною інтенсивністю 10^{24} Вт/см². Зокрема, планується повторення експериментів з народження електрон-позитронної пари при взаємодії ультрарелятивістського електрона із полем потужної лазерної хвилі, виконаних на прискорювальному комплексі SLAC (Stanford, USA) в умовах, коли поглинається не менш як п’ять квантів лазера, проте зі значно більшою інтенсивністю. Експериментальна перевірка нелінійних ефектів КЕД в потужних імпульсних полях включена до програм наукових досліджень цілої низки міжнародних проектів (ELI, FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, GSI, Darmstadt, Germany) на базі лазерної системи PHELIX (Petawatt High-Energy Laser for heavy Ion eXperiments), XFEL (European X-ray free-electron laser, DESY, Germany) та інші). Таким чином **актуальність теми** дисертаційних досліджень не викликає сумніву.

Дисертаційна робота Лебеда О.А. виконана у рамках багатьох фундаментальних наукових тем, відповідно до плану наукових досліджень Інституту прикладної фізики НАН

України згідно з державними науковими програмами, пріоритетними напрямками розвитку науки й техніки. Це також підкреслює її важність і актуальність.

Основні положення та висновки роботи, їх новизна, обґрунтованість та достовірність. В дисертаційній роботі Лебеда О.А. побудована теорія елементарних процесів КЕД в полі потужної імпульсної лазерної хвилі в рамках наближення, у котрому в якості базових функцій використовуються волковські розв'язки рівняння Дірака, а квантовані електромагнітні поля (фотони) описуються стандартною квантовою електродинамікою (картина Фаррі). Це є можливим, оскільки обрана в дисертації обвідна функція не порушує головної умови на потенціал лазерної хвилі, при якому розв'язок Волкова справедливий, тобто лазерна хвиля залишається плоскою хвилею. Треба відзначити, що функції Волкова використовуються в дисертаційній роботі також для опису КЕД процесів у полі двох імпульсних лазерних хвиль. Єдиний випадок, коли це можливо, відповідає поширенню обох лазерних хвиль строго в одному напрямку.

Основний зміст дисертаційної роботи включає **вступ**, і п'ять **розділів**. **Вступ** має формальний характер. Для мене важливо, що в ньому вказана наукова новизна отриманих результатів та показано особистий внесок дисертанта у окремі журнальні статті, на яких базується текст дисертації.

У **першому розділі** наведено хронологію досліджень, теоретичних та експериментальних, так чи інакше поєднаних із темою дисертації та вказано на пробіли в них, які мусять бути заповненими і фактично формулюють ті невіршені завдання, котрі досліджуються у дисертації. Приводяться характеристики існуючих імпульсних (квазімонохроматичних) лазерів та тих, котрі планується побудувати в рамках міжнародних проектів дослідження КЕД процесів в сильних електромагнітних полях. Дано отримання розв'язків Волкова для монохроматичної та імпульсної лазерних хвиль і обговорюється їх принципова різниця. Вказано на те, що у полі двох лазерних хвиль має бути ефект, обумовлений інтерференцією лазерних хвиль. Обговорюються кількісні значення параметрів, від яких залежать КЕД процеси в лазерних полях. Серед них класичний параметр, котрий залежить тільки від характеристик лазерних хвиль, та квантові параметри: Букіна-Федорова і інтерференційний, які залежать не тільки від лазерної хвилі, а також від енергії та імпульсу тієї частинки, з якою взаємодіє лазерна хвиля.

Другий розділ присвячено дослідженню пружного розсіяння електронів на ядрах та в лазерних полях різних конфігурацій та за різних кінематичних умов. Енергія початкового електрону вважається достатньо великою, так що кулонівськими поправками до борнівського наближення можна знехтувати. Другими словами, враховується тільки однократна взаємодія електрона із полем ядра. Кількісні розрахунки наведено за умови циркулярної поляризації лазерних хвиль. Розглянуто розсіяння на дуже малі кути в полі одної імпульсної лазерної хвилі. При цьому в потенціал ядра введено розмірний параметр, котрий експоненціально екранує взаємодію на великих відстанях і таким чином регуляризує резерфордівську розбіжність. Досліджено особливості парціальних процесів випромінювання та поглинання квантів лазерної хвилі, коли передані імпульси по модулю одного порядку за величиною з імпульсом квантів зовнішнього лазерного поля та їх вплив на кутовий розподіл розсіяних електронів. У випадку розсіяння в полі двох імпульсних хвиль в аналітичному вигляді отримано формулу для диференційного перерізу розсіяння на великі кути. Показано, що ефект впливу лазерного поля фактично відсутній у випадку ультрарелятивістських енергій, коли поглинання або випромінювання кінцевого числа квантів лазера фактично не впливає на кінематику процесу. Для нерелятивістських електронів досліджено кінематичні умови, за якими можна спостерігати ефекти, зумовлені інтерференційною областю (де інтерференція лазерних хвиль є суттєвою) та областю Бункіна-Федорова. Вивчені відповідні кутові та енергетичні розподіли розсіяних електронів.

Третій розділ включає дослідження випромінювання фотона електронем в полі ядра і двох імпульсних лазерних хвиль за резонансних та нерезонансних умов, який в таких випадках раніш не розглядався. Вивчено умови спостереження та кількісні характеристики

прояву нерезонансного параметричного інтерференційного ефекту, що проявляється в кореляції випромінювання та поглинання фотонів однієї хвилі відносно іншої. При цьому дуже суттєвою є кінематика розсіяння електрона та випроміненого фотона, а саме: розсіяння та випромінювання відбуваються в одній площині, що утворена 3-імпульсом початкового електрона та напрямком поширення обох лазерних хвиль. Проаналізовано підсумований по всіх парціальних внесках кутовий розподіл розсіяного електрона і показано, що відповідний переріз може перевищувати переріз гальмівного випромінювання за відсутності поля лазерних хвиль.

Резонансні умови виникають, коли проміжні електрони на діаграмах Фейнмана виходять на масову поверхню. Завдяки невизначеності закону збереження енергії, особливості функцій Гріна проміжних електронів з'являються не у фіксованих точках, а в деякому інтервалі їх віртуальності. Інтегрування по цьому інтервалу регуляризує відповідні внески полюсів без застосування добре відомої феноменологічної процедури Брейта-Вігнера. Численні розрахунки показують, що в резонансній області диференціальний переріз може на декілька порядків величини перевищувати відповідний переріз за відсутності зовнішнього поля. Ефект різко зменшується з ростом енергії електрона.

У **четвертому розділі** досліджено процес народження електрон-позитронної пари неполяризованим фотоном на ядрі і в полі однієї та двох імпульсних лазерних хвиль. Виконано порівняння азимутальних розподілів, підсумованих по парціальних процесах випромінювання та поглинання квантів лазерної хвилі, для монохроматичної та імпульсної хвиль поблизу порогу утворення пари.

Резонансний ефект в розглянутому процесі в полі імпульсної лазерної хвилі має місце при енергіях фотона значно більших за подвійну енергію спокою електрона і при поглинанні одного лазерного кванта. Відзначу, що отриманий ефект якісно і кількісно суттєво відрізняється від випадку гальмівного випромінювання.

Процес фотонародження пари поблизу порогу також розглянуто у полі двох імпульсних лазерних хвиль в інтерференційній кінематиці. У цьому випадку отримано розподіл по кінетичній енергії пари, який вказує на наявність коливань у межах інтерференційної області. Кожний максимум відповідає випромінюванню чи поглинанню рівної кількості квантів обох хвиль.

У **п'ятому розділі** досліджено процес розсіяння електрона на електроні в сильному імпульсному лазерному полі при високій енергії і достатньо малих кутах розсіяння. В такій кінематиці тотожністю кінцевих електронів можна знехтувати. Проаналізовано резонансний внесок, коли проміжний фотон, за рахунок якого здійснюється взаємодія між електронами, знаходиться поблизу масової оболонки. Показано, що резонансний переріз суттєво залежить від відношення роботи, виконаної полем над електроном до початкової енергії електронів, і швидко зменшується зі збільшенням енергії та зменшенням потужності лазерного поля. Істотною є також залежність від поляризації хвилі. Резонансний внесок до перерізу для лазер-модифікованого процесу в розглянутому випадку може перевищувати відповідний переріз за відсутності зовнішнього лазерного поля на декілька порядків.

Основні результати дисертаційної роботи Лебеда О.А., на мою думку, полягають у наступному.

– Розсіювання електрона на ядрі в області малих кутів характеризується наявністю виділених напрямів розсіювання, на яких диференціальний переріз розсіювання електрона на ядрі в імпульсному лазерному полі до двох порядків перевищує переріз розсіювання за відсутності зовнішнього поля. Переріз процесу розсіювання в полі двох імпульсних хвиль в інтерференційній області для окремих значень енергії кінцевого електрона на порядок величини перевищує переріз в іншій кінематиці.

– Процес гальмівного випромінювання електрона на ядрі в полі двох імпульсних хвиль характеризується наявністю особливої кінематичної області, де переріз процесу має резонансний характер, а стимульовані полем процеси випромінювання і поглинання фотонів першої і другої хвилі протікають корельованим чином. Резонансний переріз процесу з

одночасною реєстрацією кутів вильоту спонтанно випроміненого фотона та електрона може на кілька порядків величини перевищувати відповідний переріз за відсутності поля.

– Показано, що підсумований по парціальних процесах випромінювання та поглинання переріз процесу фотонародження пари на ядрі більший за переріз звичайного процесу для усіх значень азимутального кута. Максимум відношення перерізів відповідає вильоту електрона і позитрона в одній площині з фотоном зовнішнього поля і початковим фотоном. Резонанс для цього процесу має місце, коли енергія початкового фотона більша граничного значення, яке значно більше за дві енергії спокою електрона, тому народжені електрон і позитрон мають ультрарелятивістські енергії.

Наукові результати та положення дисертаційної роботи Лебеда О.А., які виносяться на захист, достовірні та обґрунтовані, оскільки всі вони базуються на визнаних та широко апробованих методах квантової електродинаміки, теоретичної та математичної фізики. Дослідження, здійснені в дисертації, базуються на точних розв'язках рівняння Дірака для електрона в полі плоскої електромагнітної хвилі. У граничних випадках нові результати співпадають з раніш відомими.

Основні результати роботи доповідалися здобувачем і обговорювалися на міжнародних наукових конференціях і нарадах. Результати також регулярно обговорювалися на семінарах відділу «Квантової електродинаміки сильних полів», засіданнях Вченої ради та конференціях молодих науковців Інституту прикладної фізики НАН України.

Цінність результатів роботи для науки і практики. Здобуті в дисертаційній роботі результати дають фундаментальні уявлення про розсіювання електронів на ядрах, народження електрон-позитронних пар в присутності імпульсних лазерних полів. Перевагою представленої роботи можна вважати широке застосування та розвиток аналітичних методів, що дозволило представити диференційні перерізи розглянутих процесів за допомогою досить компактних математичних формул. Важливо відмітити, що аналітичні результати більш наочно демонструють фізичні властивості процесів під впливом лазерного поля, полегшують їх подальше використання та дозволяють досліджувати нові явища, закономірності та властивості процесів.

Отримані в роботі результати можна екстраполювати на рентгенівський діапазон квантів зовнішнього поля, коли їх енергія значно менша за енергію спокою електрона. Використані наближення квазімонохроматичності хвилі та помірно сильної її інтенсивності відповідають сучасним лазерним джерелам рентгенівського випромінювання.

В роботі значний акцент поставлено на дослідження лазер-модифікованих процесів за участі ядра. Експериментальне дослідження властивостей таких процесів в імпульсних лазерних полях на сьогоднішній день активно розвивається та ставить нові виклики, тому теоретичні результати та розвиток моделей опису відносно них представляє наукову цінність.

Зауваження щодо змісту дисертації.

1) У дисертації є неточності в тексті та деяких формулах. Я виявив наступні:

- а) описка в першому рядку на стор. 88 в формулі пропущено τ в знаменнику;
- б) неправильна оцінка значення довжини екранування в тексті на с. 95;
- в) граматична помилка в кінці першого абзацу на с. 131;
- г) неточність в умові (2.66);
- д) описка в умові на інтенсивність поля (5.10) на с. 234.

2) В деяких формулах дисертації не зовсім зрозуміло якому випадку відповідає знак «+», а якому – «-». Наприклад, для процесу розсіювання електрона на ядрі у формулі (2.82), що дає явний вигляд компонент переданого імпульсу в області малих кутів і ультрарелятивістських енергій електрона. Слід було приділити більше уваги розділу цих умов в тексті роботи.

3) При постановці задачі дослідження процесів в полі двох хвиль не завжди вказується, що мова йде про колінеарні хвилі. А це досить важливо, оскільки функції

Волкова, як аналітичний розв'язок рівняння Дірака, коректно застосовувати тільки в цьому випадку.

Відповідність встановленим вимогам до докторських дисертацій.

Дисертаційна робота Лебеда О.А. є завершеною науковою роботою. Основні результати дисертації достатньо повно відображено у 27 наукових працях. Серед яких 13 статей, 11 із яких опубліковано у провідних фахових журналах, що входять до першого та другого квартиля наукового рейтингу по міжнародній системі Scimago Journal. По матеріалам дисертаційної роботи видано монографію вітчизняного видавництва та розділ у монографії зарубіжного видавництва. Апробація роботи проведена на міжнародних та вітчизняних конференціях, що відображено у 5 статтях матеріалів міжнародних конференцій та 7 тез доповідей. Автореферат дисертації повністю відповідає її змісту. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності «теоретична фізика» та вимогам, які пред'являються до докторських дисертаційних робіт. Зроблені зауваження не впливають на мою високу оцінку дисертації в цілому.

На підставі вище викладеного можна стверджувати, що робота Лебеда О.А. “Нелінійні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному імпульсному полі лазера” за актуальністю, ступенем новизни, значимістю для науки і практики, а також за структурою і об'ємом відповідає вимогам до докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, які унесені згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р., №567 від 27.07.2016) та свідчить про високий науковий рівень автора, який заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ ХФТІ НАН України

М.П. Меренков

Підпис М.П. Меренкова засвідчую.
Вчений секретар Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ ХФТІ НАН України



А.І. Кірдін